



Grüner als gedacht

Land- und Baumaschinen sind führend bei Emissionsreduktionen

Marcus Geimer, Danilo Engelmann

Land- und Baumaschinen erfüllen heute die höchsten Ansprüche an eine Minimierung der Schadstoffemissionen. Dieser Vergleich zeigt, dass die gültigen Richtlinien für Dieselmotoren sogar strenger als die für Pkw sind.

Fahrzeuge, die für einen Einsatz abseits der Straßen entwickelt werden, wie z. B. Land- und Baumaschinen, werden heute aufgrund der hohen notwendigen Energie- und Leistungsdichte bevorzugt verbrennungsmotorisch angetrieben. Aufgrund der Drehmomentcharakteristik des Verbrennungsmotors wird dabei als Energiespeicher Dieselmotorkraftstoff eingesetzt.



Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer, Institutsleiter,
Dipl.-Ing. Danilo Engelmann, akademischer Mitarbeiter
*Forschungsgruppe: Steuerungs- und Assistenzsysteme; Beide
 Karlsruher Institut für Technology KIT, Institut für Fahrzeug-
 systemtechnik, Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen*

Geregelt werden die zulässigen Schadstoffemissionen eines Dieselmotors für Land- und Baumaschinen in der Richtlinie 97/68/EG [1]. Neben den genannten Maschinen werden in dieser Richtlinie auch Schiffe und Eisenbahnen geregelt. Ab dem 1. Januar 2015 ist die Stufe IV für Motoren von 56 kW bis 560 kW in Europa bindend. Entgegen der in [2] dargestellten Informati-

onen sind die Motoren der genannten Maschinen weder unreguliert, noch ist die Stufe IIIB aktuell gültig. Je nach Motorleistung wurde die Stufe IIIB in den Jahren 2013 bis 2014, mit einer Übergangsfrist bis Ende 2014, durch die Stufe IV abgelöst. Eine sehr komprimierte und übersichtliche Darstellung der gültigen Grenzwerte für die genannten Maschinen ist in [3] zu finden.

Für Pkw ist seit dem 1. September 2015 die Abgasstufe Euro 6 bindend, [4]. Genau wie bei den Maschinen müssen alle neu in den Verkehr gebrachten Fahrzeuge die Grenzwerte einhalten. Bereits zugelassene oder in Verkehr gebrachte Fahrzeuge, wie z. B. solche mit H-Kennzeichen, die meist keine Schadstoffminderungseinrichtungen besitzen, müssen nicht nachgerüstet werden.

Die Tabelle 1 fasst in den ersten beiden Zeilen die heute gültigen Emissionsgrenzwerte für Stickoxide (NO_x) und Partikel (PM) von Maschinen und Pkw zusammen. Hierin ist die Problematik eines direkten Vergleichs zu erkennen: während die Schadstoffgrenzwerte für Pkw auf die zurückgelegte Strecke in km bezogen werden, werden sie bei den Maschinen auf die Motorenergie in kWh bezogen. Im Folgenden werden Möglichkeiten zu einer Umrechnung vorgestellt, damit die Emissionsgrenzwerte objektiv miteinander verglichen werden können.

Umrechnung durch den zulässigen Flottenverbrauch

Ein erklärtes Ziel der Europäischen Union ist es, den CO₂-Ausstoß im Jahre 2020 im Vergleich zum Jahr 1990 um 20 % zu senken. Die Bundesregierung hat dieses Ziel sogar dahingehend verschärft, dass Sie eine Reduktion um 40 % im genannten Zeitraum anstrebt. Aus diesem Grund wurde auch der Flottenverbrauch von Pkw begrenzt, [5]: Aktuell gilt ein CO₂-Grenzwert von 120 g/km, ab dem Jahre 2020 wird dieser Grenzwert auf 95 g/km reduziert.

Der Ausstoß von CO₂ ist eine unmittelbare Folge der motorischen Verbrennung. Aus der Verbrennungschemie mit der Randbedingung einer vollständigen Oxidation des im Dielektrikstoff gebundenen Kohlenstoffs kann das CO₂-Äquivalent eines Liters Kraftstoff zu 2,64 kgCO₂/l Diesel ermittelt werden. Reale Messungen an zwei Traktoren haben in [6] gezeigt, dass das tatsächliche CO₂-Äquivalent bei ungefähr 2,70 kgCO₂/l Diesel liegt.

Unter Berücksichtigung des gemessenen CO₂-Äquivalents kann auf einen Kraftstoffverbrauch rückgerechnet werden:

$$b_{\text{Diesel}} = \frac{\text{CO}_2\text{-Ausstoß}}{\text{CO}_2\text{-Äquivalent}} \quad (1)$$

Im vorliegenden Fall berechnet sich daraus der spezifische Kraftstoffverbrauch:

$$b_{\text{Diesel}} = \frac{120 \frac{\text{g}}{\text{km}}}{2,70 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 4,44 \frac{\text{l}}{100 \text{ km}} \quad (2)$$

Dieser Wert erscheint auf Basis von Erfahrungen als Durchschnittswert für Pkw plausibel.

Für eine Umrechnung U des oben errechneten Verbrauchs auf die spezifische Motorenergie muss der spezifische Verbrauch „b“ „e“ eines Verbrennungsmotors bekannt sein:

$$U = \frac{b_e}{\rho \cdot b_{\text{Diesel}}} \quad (3)$$

Da sich dieser in seinem Kennfeld ändert kann für eine Best-Case-Abschätzung der minimale spezifische Verbrauch herangezogen werden. Nach aktuellem Kenntnisstand beträgt der minimale spezifische Verbrauch eines Dieselmotors etwa 200 g/kWh, [7, 8, 9].

$$U_B = \frac{200 \text{ g/kWh}}{0,83 \text{ kg/l} \cdot 4,44 \text{ l/100 km}} = 5,42 \frac{\text{km}}{\text{kWh}} \quad (4)$$

Mit Hilfe des Umrechnungsfaktors können nun die bestenfalls von einem Pkw zu erreichenden Emissionswerte auf den Energiebedarf umgerechnet werden. Die Ergebnisse sind in der 3. Zeile der Tabelle zusammengefasst. Dabei zeigt sich, dass die Emissionsgrenzwerte der Maschinen und Pkw gleich hohe Werte im Best-Punkt des Verbrennungsmotors zulassen.

Umrechnung auf Basis gemessener Verbrauchswerte

Im nun folgenden Kapitel erfolgt auf Basis von Messwerten an Fahrzeugen die Umrechnung der Emissionen einer zurückgelegten Strecke [km] auf die Motorenergie [kWh].

Zum ersten kann der Energieverbrauch im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) eines Fahrzeugs gemessen werden. So wird beispielsweise in [10] die mittlere Antriebsleistung im NEFZ mit 4 kW angegeben. Aus der Abgasgesetzgebung [4] ist zudem bekannt, dass der NEFZ-Zyklus 1.180 s dauert und 11 km lang ist. Der Umrechnungsfaktor UNEFZ berechnet sich so zu:

$$U_{\text{NEFZ}} = \frac{11 \text{ km}}{4 \text{ kW} \cdot 1.180 \text{ s}} = 8,39 \frac{\text{km}}{\text{kWh}} \quad (5)$$

Mit Hilfe dieses Umrechnungsfaktors kann erneut der für Pkw äquivalente Emissionswert berechnet werden, vgl. Zeile 4 in Tabelle. Im Gegensatz zu dem Best-Case-Szenario zeigen sich bei den Maschinen jetzt deutlich bessere Emissionswerte als beim Pkw.

Begründet werden kann das Ergebnis unter Berücksichtigung des spezifischen Verbrauchs mit den gewählten NEFZ-Daten:

$$b_{e,\text{NEFZ}} = 200 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \cdot \frac{8,39 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}}{5,42 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}} = 310 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \quad (6)$$

Zeile	Grundlage	Fahrzeug	NOx	Partikel	Bemerkung
1	97/68/EG	Maschine	0,4 g/k Wh	0,025 g/kWh	–
2	91/441/EWG	Pkw	80 mg/km	4,5 mg/km	–
3	$U_B = 5,42 \text{ km/kWh}$	Pkw	0,4 g/kWh	0,024 g/kWh	Best-Case
4	$U_{\text{NEFZ}} = 8,39 \text{ km/kWh}$	Pkw	0,7 g/kWh	0,038 g/kWh	NEFZ-Zyklus
5	$U_{\text{WLTP}} = 6,64 \text{ km/kWh}$	Pkw	0,5 g/kWh	0,030 g/kWh	neuer WLTP-Zyklus
6	70km/h	Pkw	0,7 g/kWh	0,039 g/kWh	Konstandfahrt

Tabelle: Emissionsgrenzwerte nach [1,4], teilweise umgerechnet

Es zeigt sich hier, dass die Betriebspunkte des NEFZ nicht im Bereich des optimalen Verbrauchs im Motorkennfeld liegen, somit einen höheren spezifischen Verbrauch besitzen. Aufgrund der geringen Motorbelastung im Zyklus des NEFZ ist auch dieser Wert plausibel.

Etwas verbessert wird diese Situation durch den neu angestrebten Testzyklus „Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure (WLTP)“. Nach [10] wird in dem Zyklus eine mittlere Antriebsleistung von 7 kW benötigt, der Zyklus dauert 30 Minuten und hat eine Länge von 23,25 km. Umrechnungsfaktor UWLTP und Emissionen lassen sich analog berechnen, vgl. Zeile 5 in Tabelle:

$$U_{\text{WLTP}} = \frac{23,25 \text{ km}}{7 \text{ kW} \cdot 30 \text{ min}} = 6,643 \frac{\text{km}}{\text{kWh}} \quad (7)$$

Eine weitere Möglichkeit eines Emissionsvergleichs ist die Auswahl eines speziellen Betriebspunkts. Hierzu muss z. B. die für eine gewisse Geschwindigkeit v notwendige Leistung P_v eines Pkw bekannt sein. Renius gibt z.B. in seinem Leserbrief zum Artikel [2] an, dass bei 70 km/h eine Leistung von 8 kW benötigt wird. Der Umrechnungsfaktor berechnet sich dabei zu:

$$U_v [\text{km/kWh}] = \frac{v [\text{km/h}]}{p [\text{kW}]} \quad (8)$$

Die Zeile 6 in Tabelle gibt die für die Geschwindigkeit umgerechneten Emissionen eines Pkw an. Man erkennt im Vergleich zur Maschine deutlich höhere Emissionen beim Pkw, aber ähnlich hohe Werte wie im NEFZ.

Im besten Fall gleich hohe Emissionen

Die Emissionen von Pkw und mobilen Maschinen, wie z. B. Land- und Baumaschinen, werden heute unterschiedlich reglementiert. Während die Emissionen bei Pkw auf die zurückgelegte Strecke [km] bezogen werden, werden Sie bei mobilen Maschinen auf die erzeugte Energie [kWh] bezogen. Dies hat zur Folge, dass eine direkte Umrechnung der Emissionsgrenzwerte nicht möglich ist.

In der vorliegenden Studie wurden Möglichkeiten zur Umrechnung der Emissionen für einen Vergleich vorgestellt. Neben einer

Best-Case-Betrachtung wurden aktuelle Leistungskennwerte von Pkw, z. B. aus dem NEFZ oder bei einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit, herangezogen. Dabei zeigt sich, dass die Emissionen bei Pkw bestenfalls gleich hoch sind wie die von mobilen Maschinen, im praktischen Betrieb jedoch in der Regel höher. ■

Literaturverzeichnis: [1] Richtlinie 2010/26/EU der Kommission vom 31. März 2010 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emissionen von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte.

[2] Kellerhoff, P.: Land- und Baumaschinen hinken Pkw hinterher, VDI nachrichten vom 9. Oktober 2015, Nr. 41, S. 13.

[3] Abgasgesetzgebung – Diesel- und Gasmotoren, VDMA Motoren und Systeme, Stand Juni 2006.

[4] Richtlinie des Rates vom 26. Juni 1991 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen, Internet: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0441&from=de>, Stand: 02.11.2015.

[5] Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, Internet: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ%3AL%3A2009%3A140%3A001%3A0015%3ADE%3APDF>, Stand 02.11.2015.

[6] Clare, D.A. et al.: Real world measurement of carbon dioxide emissions of agricultural tractor using a portable emissions measurement system, Conference: Agricultural Engineering, 6.-7. Nov. 2015, Hannover. In: VDI-Berichte Nr. 2251, 2015, S. 21-27.

[7] Kleibl, A.: Effizienzbewertung bei Spezialtiefbaumaschinen, 6. Fachtagung Baumaschinentechnik 2015, 17./18. September 2015, Dresden. In: Tagungsband, Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V. (FVB), Heft 49, S. 129.

[8] Geimer, M. und Pohlandt, C.: Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Band 22, ISBN 978-3-7315-0188-6, Seite I-13.

[9] Effektiver Kraftstoffverbrauch, Internet: <http://www.motorlexikon.de/?I=3492>, Bild K285, Stand 03.11.2015.

[10] NEFZ und WLTP, Verband der Automobilindustrie VDA, Internet: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/nefz-und-wltp/nefz-und-wltp.html>, Stand 03.11.2015.

Bilder: Fotolia

www.fast.kit.edu